第48卷 第1期
2025年1月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 48 No. 1
Jan. 2025

黄河流域水资源利用驱动因素及脱钩效应研究

杨燕燕， 王永瑜， 徐绮阳

（兰州财经大学统计与数据科学学院，甘肃 兰州 730020）

摘 要： 实现水资源可持续利用是黄河流域生态保护和高质量发展的重要内容。采用水足迹法测度2000—2020年黄河流域56个地级市的水资源实际消耗情况，通过对数均值迪氏指数法揭示用水变化的主要影响因素，并结合DPSIR框架构建脱钩努力指数模型测度水资源利用脱钩效应。结果表明：（1）2000—2020年黄河流域水资源利用呈现波动上升趋势，农业生产用水是其主要组成部分，所占比重均在90%以上。（2）经济发展效应与人口规模效应对水资源消耗起正向驱动作用，用水强度效应与产业结构效应起负向驱动作用。（3）水资源利用与经济发展脱钩效果整体较好，主要有弱脱钩和强脱钩2种状态。具体来看，中游和下游地区的脱钩状态优于上游地区；工业生产用水和服务业用水的脱钩状态优于农业生产用水。（4）水资源利用脱钩效应转变过程中，产业结构效应和水资源禀赋效应是实现区域脱钩的重要因素，而用水强度效应和水资源禀赋效应是实现行业脱钩的关键所在。研究结果可为黄河流域水资源与经济绿色协调发展提供理论参考。

关 键 词： 水足迹；DPSIR框架；对数均值迪氏指数；脱钩模型；黄河流域

文章编号： 1000－6060(2025)01－0020－11(0020～0030)

黄河流域是中华民族母亲河，也是中国重要的生态屏障和经济地带，在国家生态安全和经济社会发展方面十分重要。黄河流域生态保护和高质量发展，同京津冀协同发展、长江经济带发展、粤港澳大湾区建设、长三角一体化发展一样，是重大国家战略。近年来黄河流域经济社会发展和生态环境治理取得了巨大成就，但受自然地理因素与人为因素影响，黄河流域水资源短缺情况十分明显；在城市化进程持续推进和人口规模不断扩张过程中，水资源短缺形势将更为严峻。在此背景下，科学量化黄河流域水资源利用情况并研究其驱动因素与脱钩效应，对于转变水资源开发利用方式，推动黄河流域生态保护和高质量发展至关重要。

水资源供需矛盾日益突出，水资源的相关研究逐渐成为学术热点。从水资源利用的驱动因素来看，主要运用对数均值迪氏指数（LMDI）分解方法，从经济发展水平、产业结构、用水强度、人口规模等方面进行考察。如刘慧等[1]认为人均GDP与人口增长是用水总量增加的主要原因，而用水强度和产业结构变化能够抑制用水总量增加；秦昌波等[2]认为经济发展水平提高是引起用水量增加的决定性因素，而产业结构调整可降低用水需求压力；孙才志等[3]发现经济发展水平提高是引发水资源消耗的主要驱动力，而产业结构优化与用水强度下降将会抑制用水量增加。从水资源利用与经济增长的脱钩分析来看，主要围绕农业生产用水[4]、工业生产用水[5]、生活用水[6]和用水总量[7]等多个视角展开，近年来基于水足迹理论与方法考察两者之间脱钩关系的研究逐渐增多[8-9]；研究方法主要有Vehmas脱钩模型、Tapio脱钩弹性指数法、IPAT方程模型法等[10-11]，其中Tapio脱钩弹性指数法是描述经济发展与水资源消耗之间协调发展的最佳方法，使用更为广泛[12-13]。

收稿日期： 2024-02-01； **修订日期：** 2024-06-01

基金项目： 国家社会科学基金项目（22BTJ002）；甘肃省教育厅“双一流”重点科研项目（GSSYLXM-06）；甘肃省教育厅高校教师创新基金项目（2024A-080）资助

作者简介： 杨燕燕（1993-），女，博士，副教授，主要从事水资源核算与环境经济核算研究. E-mail: yyywjmedu@163.com

通讯作者： 王永瑜（1965-），男，博士，教授，主要从事环境经济统计与分析研究. E-mail: 139419197869@163.com

研究范围包括国家[14]、省域[15]、城市群[16]和流域经济带[17]等。从黄河流域水资源相关研究来看，学者们结合水资源供需矛盾尖锐[18]，且具有水少沙多、水沙关系不协调的典型特征[19]，对黄河流域水资源优化配置[20]、水生态系统服务[21]以及水资源利用与经济发展关系[22-23]等问题进行研究，为黄河流域水资源管理与可持续发展提供决策依据。

综上，国内外学者对水资源相关研究已经取得了较为丰富的研究成果，但仍存在以下不足：(1) 较多文献运用Tapio脱钩模型分析水资源利用与经济发展脱钩情况，而在因素分解的基础上，鲜有基于DPSIR框架开展水资源利用脱钩效应研究。(2) 对水资源利用驱动因素考虑不够完整，未将资源属性纳入水资源利用率、水资源禀赋等指标。(3) 对黄河流域地级市的相关研究关注较少。基于此，本文采用水足迹法定量分析2000—2020年黄河流域地级市的水资源真实利用情况，结合DPSIR框架构建脱钩努力指数模型对水资源利用脱钩效应进行测度，并按照不同规划期从区域比较与行业比较视角进行深入分析，以期为黄河流域生态保护和高质量发展提供有益参考。

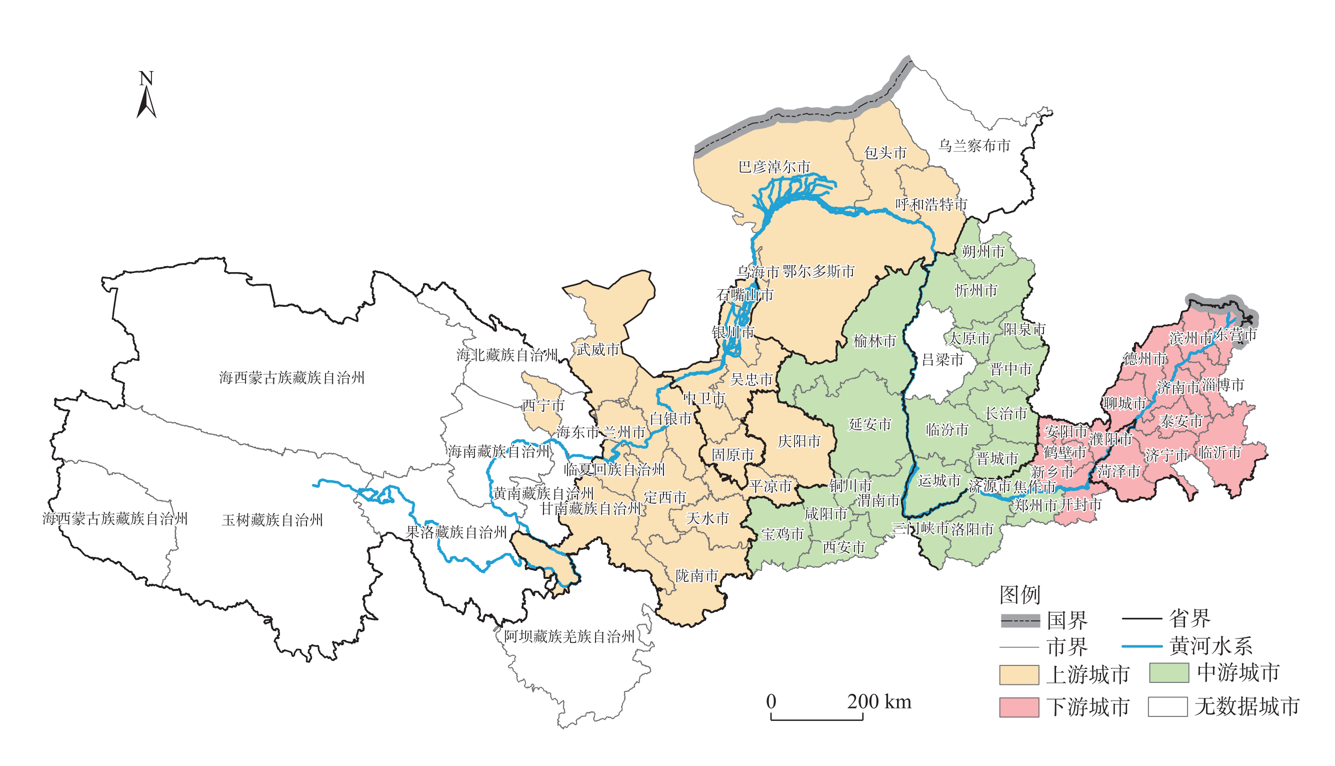
1　数据与方法

1.1　研究区概况

黄河流域发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓，从西到东依次流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、山东、河南9个省(区)，共涉及66个地级市340个县(市、旗)[24](图1)。考虑到数据的科学性和完整性，暂未将指标缺失较多的海东、海北等区域纳入研究范围，故本文研究对象为黄河流域的56个地级市。进一步借鉴相关研究成果[25]，以内蒙古呼和浩特和河南郑州为分界线将其分为黄河流域上游、中游、下游。2000—2020年黄河流域地级市实际地区生产总值从1.40×10^{12}元增加至11.70×10^{12}元，经济社会发展向好；用水总量从589.66×10^{8} m^3增加至629.38×10^{8} m^3。其中，农业生产用水占比最高，工业生产用水次之，生活用水较少[19]。

1.2　数据来源

本文数据主要来源于2001—2021年《中国城市统计年鉴》《中国区域经济统计年鉴》、各省区水资源公报、各城市统计年鉴。部分缺失数据采用插值法进行填补。在水足迹测算中，农业生产用水量采



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

用“自下而上法”进行计算，将农业产品产量与单位产品所含虚拟水量相乘[17]。其中，农业产品分为农作物产品和动物产品，单位虚拟水含量参考Chapagian等[26]的研究成果，如表1所示。

表1 农作物产品与动物产品的单位产品虚拟水含量

Tab. 1 Volume of virtual water per weight of crops and animal products /kg·m^{-3}

农作物产品	粮食	油料	甘蔗	棉花	水果	茶叶	蔬菜
虚拟水含量	0.88	3.97	0.27	4.40	0.82	13.17	0.11
动物产品	羊肉	牛肉	猪肉	禽肉	禽蛋	水产品	牛奶
虚拟水含量	5.20	12.56	2.21	3.11	3.55	5.00	2.20

1.3 研究方法

1.3.1 水足迹计算模型 水足迹是指一定时间内某研究区消费的所有产品和服务所需要的水资源总量[27]，主要包括实体水和虚拟水2部分，计算公式如下：

$$\mathrm{WFP}=\mathrm{IWFP}+\mathrm{EWFP} \tag{1}$$

$$\mathrm{IWFP}=\mathrm{WFP}_{\mathrm{agr}}+\mathrm{WFP}_{\mathrm{ind}}+\mathrm{WFP}_{\mathrm{dom}}+\mathrm{WFP}_{\mathrm{eco}}-\mathrm{FW}_{\mathrm{e}} \tag{2}$$

$$\mathrm{EWFP}=\mathrm{FW}_{\mathrm{i}}-\mathrm{FW}_{\mathrm{re\text{-}export}} \tag{3}$$

式中：WFP为总体水足迹（10^8 m^3）；IWFP为内部水足迹（10^8 m^3）；EWFP为外部水足迹（10^8 m^3）；$\mathrm{WFP}_{\mathrm{agr}}$、$\mathrm{WFP}_{\mathrm{ind}}$、$\mathrm{WFP}_{\mathrm{dom}}$、$\mathrm{WFP}_{\mathrm{eco}}$分别为农业、工业、生活、生态环境用水量（$10^8$ m^3）；FW_{e}、FW_{i}分别为出口到其他地区和从其他地区进口的虚拟用水量（10^8 m^3）；$\mathrm{FW}_{\mathrm{re\text{-}export}}$为从其他地区进口再出口的虚拟用水量（$10^8$ m^3）。

1.3.2 LMDI因素分解模型 LMDI因素分解模型具有完全分解无残差、加法分解和乘法分解保持一致等优点，是分析水资源利用变化影响因素的主流分解方法[28-29]。本文运用此模型对黄河流域用水量进行分解，计算公式如下：

$$W=\sum_{i=1}^{5}W_i=\sum_{i=1}^{5}\left(\frac{W_i}{G_i}\times\frac{G_i}{G}\times\frac{G}{W}\times\frac{W}{R}\times\frac{R}{P}\times P\right)=\sum_{i=1}^{5}\left(\mathrm{int}_i\times\mathrm{str}_i\times\mathrm{dev}\times\mathrm{uti}\times\mathrm{end}\times\mathrm{pop}\right) \tag{4}$$

式中：W为黄河流域总体水足迹（10^8 m^3）；W_i为i部门水足迹（10^8 m^3）；G_i为i部门增加值（10^8元）；G为部门增加值总和（10^8元）；R为水资源总量（10^8 m^3）；P为人口数量（10^4人）；int_i、str_i、dev、uti、end、pop分别为用水强度、产业结构、经济发展、水资源利用率、水资源禀赋、人口规模。

借鉴已有研究[1,30]，本文将生态环境用水变化效应和净出口虚拟用水变化效应进行单独计算，用生活用水量近似替代服务业用水量，则0期至t期流域用水量的变化效应如下：

$$\Delta W=W_t-W_0=\Delta W_{\mathrm{int}}+\Delta W_{\mathrm{str}}+\Delta W_{\mathrm{dev}}+\Delta W_{\mathrm{uti}}+\Delta W_{\mathrm{end}}+\Delta W_{\mathrm{pop}}+\Delta W_{\mathrm{eco}}+\Delta W_{\mathrm{net}} \tag{5}$$

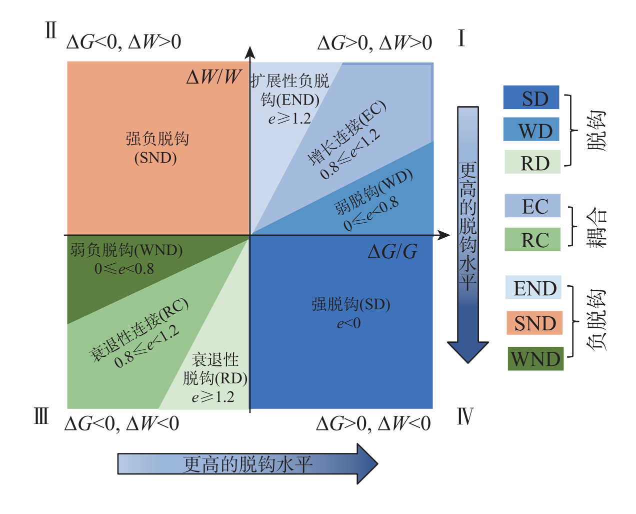
式中：ΔW为水资源利用总效应；W_t和W_0分别为t期和0期的水资源利用总量；ΔW_{int}为用水强度效应；ΔW_{str}为产业结构效应；ΔW_{dev}为经济发展效应；ΔW_{uti}为水资源利用率效应；ΔW_{end}为水资源禀赋效应；ΔW_{pop}为人口规模效应；ΔW_{eco}为生态环境用水效应；ΔW_{net}为净出口虚拟用水效应。具体测算参考孙思奥等[1]的做法。

1.3.3 脱钩努力指数模型 本文借鉴已有研究[31]，在Tapio脱钩模型和LMDI分解模型的基础上结合DPSIR框架构建水资源利用脱钩努力指数模型。其中，Tapio脱钩模型用来衡量水资源利用与经济增长之间的脱钩关系，计算公式如下：

$$e(W,G)=\frac{\Delta W/W}{\Delta G/G} \tag{6}$$

式中：ΔG为国内生产总值年增长率；$e(W,G)$为经济增长对水资源利用的脱钩弹性系数，主要划分为脱钩、负脱钩和耦合3类，细分为强脱钩、弱脱钩、增长连接等8个子类，划分结果如图2所示。

水资源利用与经济发展不同步变化的主要原因是政府对于资源环境压力会做出一定反应，其理论基础为欧洲环境署（EEA）提出的DPSIR框架——驱动



注：ΔG、ΔW分别为GDP变化率和水足迹变化率。

图2 基于Tapio模型的脱钩类型判断图

Fig. 2 Schematic of the decoupling judgment based on Tapio

力(Driver)、压力(Pressure)、状态(State)、影响(Influence)和反应(Response)。其中,“驱动力”为引发水资源短缺的主要原因,本文指国内生产总值;“压力”为经济驱动力对水资源利用量的直接影响,本文指水足迹;“状态”为水资源在面临压力时表现的状态,本文指水足迹增加;“影响”为水资源所处状态对经济、社会和生态环境的影响,本文指水资源与经济发展脱钩状态恶化;“反应”为各级政府为保证水资源可持续利用所做出的努力或采取的积极政策等,本文指用水强度降低、产业结构优化等。

本文将政府“节水控水”努力定义为直接或间接导致用水量减少所采取的举措,具体包括降低用水强度、调整产业结构等。具体公式如下：

$$\Delta W_{es} = \Delta W - \Delta W_{dev} = \Delta W_{int} + \Delta W_{str} + \Delta W_{uti} + \Delta W_{end} + \Delta W_{pop} \quad (7)$$

式中：ΔW_{dev} 为经济驱动因子；ΔW_{es} 为减少水资源消耗所采取的管理措施。根据以上分析,脱钩努力效应公式如下：

$$D_t = -\frac{\Delta W_{es}}{\Delta W_{dev}} = -\left(\frac{\Delta W_{int}}{\Delta W_{dev}} + \frac{\Delta W_{str}}{\Delta W_{dev}} + \frac{\Delta W_{uti}}{\Delta W_{dev}} + \frac{\Delta W_{end}}{\Delta W_{dev}} + \frac{\Delta W_{pop}}{\Delta W_{dev}}\right) = -\left(D_{int} + D_{str} + D_{uti} + D_{end} + D_{pop}\right) \quad (8)$$

式中：D_t 为脱钩总效应；D_{int}、D_{str}、D_{uti}、D_{end}、D_{pop} 分别为用水强度、产业结构、水资源利用率、水资源禀赋、人口规模的脱钩效应。

2　结果与分析

2.1　黄河流域水足迹构成及评价

利用水足迹方法测度2000—2020年黄河流域地级市水足迹构成及相关评价指标,具体结果如表2所示。从总体水足迹来看,2000—2020年呈现波动上升趋势,2000年水足迹最小,2017年水足迹最大。从水足迹构成方面来看,农业生产用水占比最大,历年均在90%以上,且与总体水足迹变动趋势高度相关;工业生产用水在2012年达到峰值后开始

表2　黄河流域水足迹构成及评价指标

Tab. 2　Water footprint structure and evaluation index of the Yellow River Basin

年份	农业生产用水/10^8 m^3	工业生产用水/10^8 m^3	居民生活用水/10^8 m^3	生态环境用水/10^8 m^3	进口虚拟水量/10^8 m^3	出口虚拟水量/10^8 m^3	内部水足迹/10^8 m^3	外部水足迹/10^8 m^3	总体水足迹/10^8 m^3	人均水足迹/m^3·人$^{-1}$	水资源匮乏度/%	水资源自用率/%	水资源经济效益/元·m^{-3}
2000	1596.88	73.45	47.94	7.13	11.27	26.04	1751.44	11.27	1762.71	1082.66	83.89	99.36	6.52
2001	1626.88	70.61	52.82	7.62	14.03	28.28	1786.22	14.03	1800.25	1092.95	102.76	99.22	7.06
2002	1677.59	73.23	49.49	7.65	12.31	27.85	1835.80	12.31	1848.11	1108.23	115.86	99.33	7.70
2003	1777.34	78.56	50.17	8.86	16.53	31.27	1946.20	16.53	1962.73	1149.23	51.57	99.16	8.31
2004	1960.78	73.70	52.07	9.90	19.03	35.52	2131.96	19.03	2150.99	1287.48	73.64	99.12	8.76
2005	2110.50	83.39	53.48	11.77	21.02	33.50	2292.64	21.02	2313.66	1368.05	67.35	99.09	9.38
2006	2261.85	89.10	54.46	11.89	22.31	35.66	2452.97	22.31	2475.28	1455.09	97.43	99.10	10.07
2007	2170.23	87.72	51.86	12.82	23.92	34.90	2357.53	23.92	2381.45	1381.82	77.13	99.00	12.12
2008	2290.54	89.03	57.10	14.70	23.98	32.49	2483.87	23.98	2507.85	1449.38	103.96	99.04	12.98
2009	2442.74	84.12	59.75	14.80	20.52	19.57	2621.00	20.52	2641.52	1509.32	83.64	99.22	13.77
2010	2500.27	89.40	61.94	15.93	25.93	24.17	2691.72	25.93	2717.65	1521.04	77.18	99.05	15.17
2011	2600.12	93.86	68.31	19.01	28.65	28.71	2810.01	28.65	2838.66	1562.16	71.42	98.99	16.34
2012	2673.55	97.13	70.61	25.19	38.28	28.37	2894.85	38.28	2933.13	1620.28	77.02	98.69	17.61
2013	2669.38	96.50	65.09	21.11	28.84	28.33	2880.41	28.84	2909.25	1615.58	75.33	99.01	19.57
2014	2726.42	89.84	59.71	21.12	28.08	28.96	2926.04	28.08	2954.13	1627.51	94.04	99.05	21.01
2015	2734.03	87.35	68.63	24.79	29.09	29.16	2943.96	29.09	2973.05	1646.36	104.30	99.02	22.44
2016	2697.30	80.76	68.81	27.90	28.24	28.02	2902.79	28.24	2931.02	1603.63	81.13	99.04	24.48
2017	2716.25	87.37	74.90	36.13	94.17	71.56	2986.19	94.17	3080.37	1671.17	81.93	96.94	24.97
2018	2597.31	90.40	79.01	38.81	40.36	31.79	2837.30	40.36	2877.66	1556.42	67.57	98.60	28.50
2019	2641.28	87.01	77.88	47.60	48.27	34.19	2887.97	48.27	2936.24	1569.07	83.02	97.67	29.49
2020	2698.19	70.28	89.64	62.90	40.02	31.69	2952.70	40.02	2992.72	1603.12	53.32	96.54	29.75

波动下降;随着城市化进程加快和人民生活质量水平日益提升,生活用水呈稳步上升趋势;生态环境用水呈现先小幅波动后迅速增加的变动特征,这与李秀花等[32]的研究结果较为一致;进出口虚拟水量虽表现出波动上升态势,但在总体水足迹中所占比重较小(不足5%)。从水足迹评价指标来看,2000—2020年人均水足迹呈缓慢增长态势,与总体水足迹变化趋势保持一致;水资源短缺较为严重,且水资源匮乏度呈现明显变动特征;水资源自用率始终维持在99%左右;水资源经济效益从2000年的6.52元·m^{-3}持续攀升至2020年的29.75元·m^{-3},即黄河流域利用水资源产生的经济效益逐年增加。

2.2 黄河流域水资源利用驱动因素分析

依据LMDI因素分解模型对2000—2020年黄河流域水资源利用驱动因素进行分解。为了更清晰地分析某些特殊阶段水资源利用变动情况,将研究时段按照规划期划分为"十五""十一五""十二五""十三五"4个阶段,具体结果如图3所示。

从变动趋势看,水资源利用变化效应呈明显下降特征。"十五"期间总效应最大;"十一五"时期与"十五"时期相比,下降幅度较大;"十二五"时期黄河流域水资源利用量增加较小;"十三五"时期水资源利用量变化总效应持续降低。从变动来源看,经济发展效应对水资源利用起正向驱动作用,且贡献最大,使得每年用水量增加194.77×10^{8} m^{3};产业结构效应是抑制水资源利用变化的关键驱动因素,促使用水量平均每年减少132.30×10^{8} m^{3};用水强度效应对黄河流域水资源利用变化起负向驱动作用,促使用水量平均每年减少62.29×10^{8} m^{3};人口规模效应均值为17.34×10^{8} m^{3},即人口增加会引起水资源消耗增加;水资源利用率正向驱动作用较大;水资源禀赋对水资源利用变化有双向驱动作用,主要是因为水资源供应不足以及空间分布不均衡[33];生态环境用水效应和净出口效应均相对较小。

2.3 黄河流域水资源利用与经济发展脱钩分析

2.3.1 水资源利用整体脱钩分析 依据Tapio脱钩模型测度水资源利用与经济发展的脱钩弹性指数,具体如表3所示。2000—2020年黄河流域经济增长呈现倒U型变化特征,水足迹变化率波动较大。脱钩弹性指数呈现波动下降态势,2004年脱钩弹性指数最大,取值为0.594,表现为弱脱钩状态;2018年脱钩弹性指数最小,取值为-0.596,表现为强脱钩状态。这表明黄河流域脱钩状态整体较好,在经济发展过程中水资源消耗相对较少甚至减少。

2.3.2 水资源利用脱钩空间分布特征 在考察黄河流域水资源利用与经济发展脱钩空间差异性时,基于脱钩弹性指数测算结果,依据脱钩类型将脱钩状态定义为强脱钩、弱脱钩、增长连接、扩展性负脱钩4种类型(图4)。

从地市层面来看,2001年黄河流域各地区水资源利用主要呈现强脱钩和弱脱钩2种状态,表明本时期黄河流域水资源利用脱钩状态整体较好。2010年,西宁(0.067)、天水(0.446)、定西(0.330)等水资源利用脱钩状态得到明显改善;2020年,黄河

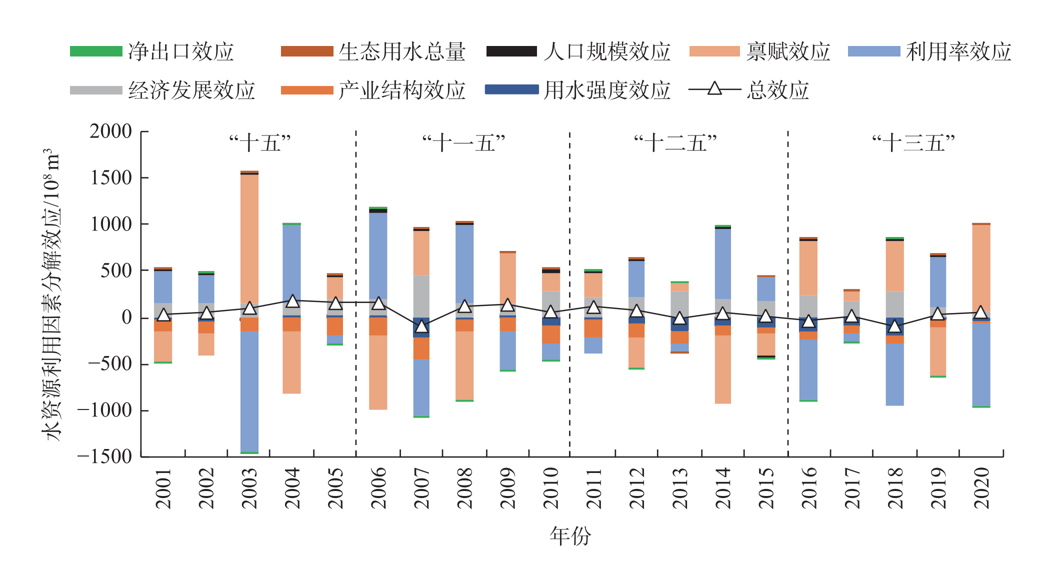


图3 黄河流域水资源利用变化驱动因素分解

Fig. 3 Decomposition of factors of water utilization change in the Yellow River Basin

表3　黄河流域水资源利用脱钩趋势分析

Tab. 3　Analysis of water resources utilization decoupling trends in the Yellow River Basin

年份	水足迹变化率/%	GDP变化率/%	脱钩弹性指数	脱钩程度	年份	水足迹变化率/%	GDP变化率/%	脱钩弹性指数	脱钩程度
2001	1.865	10.811	0.173	弱脱钩	2011	4.174	12.934	0.323	弱脱钩
2002	2.856	12.683	0.225	弱脱钩	2012	2.860	11.413	0.251	弱脱钩
2003	5.875	14.907	0.394	弱脱钩	2013	−0.363	10.285	−0.035	强脱钩
2004	9.469	15.948	0.594	弱脱钩	2014	1.589	8.410	0.189	弱脱钩
2005	7.708	16.061	0.480	弱脱钩	2015	0.488	7.026	0.069	弱脱钩
2006	7.032	15.166	0.464	弱脱钩	2016	−1.493	7.155	−0.209	强脱钩
2007	−3.974	16.135	−0.246	强脱钩	2017	1.112	7.062	0.157	弱脱钩
2008	5.492	12.919	0.425	弱脱钩	2018	−3.884	6.518	−0.596	强脱钩
2009	6.154	11.876	0.518	弱脱钩	2019	1.427	5.680	0.251	弱脱钩
2010	2.513	13.783	0.182	弱脱钩	2020	1.851	7.978	0.232	弱脱钩

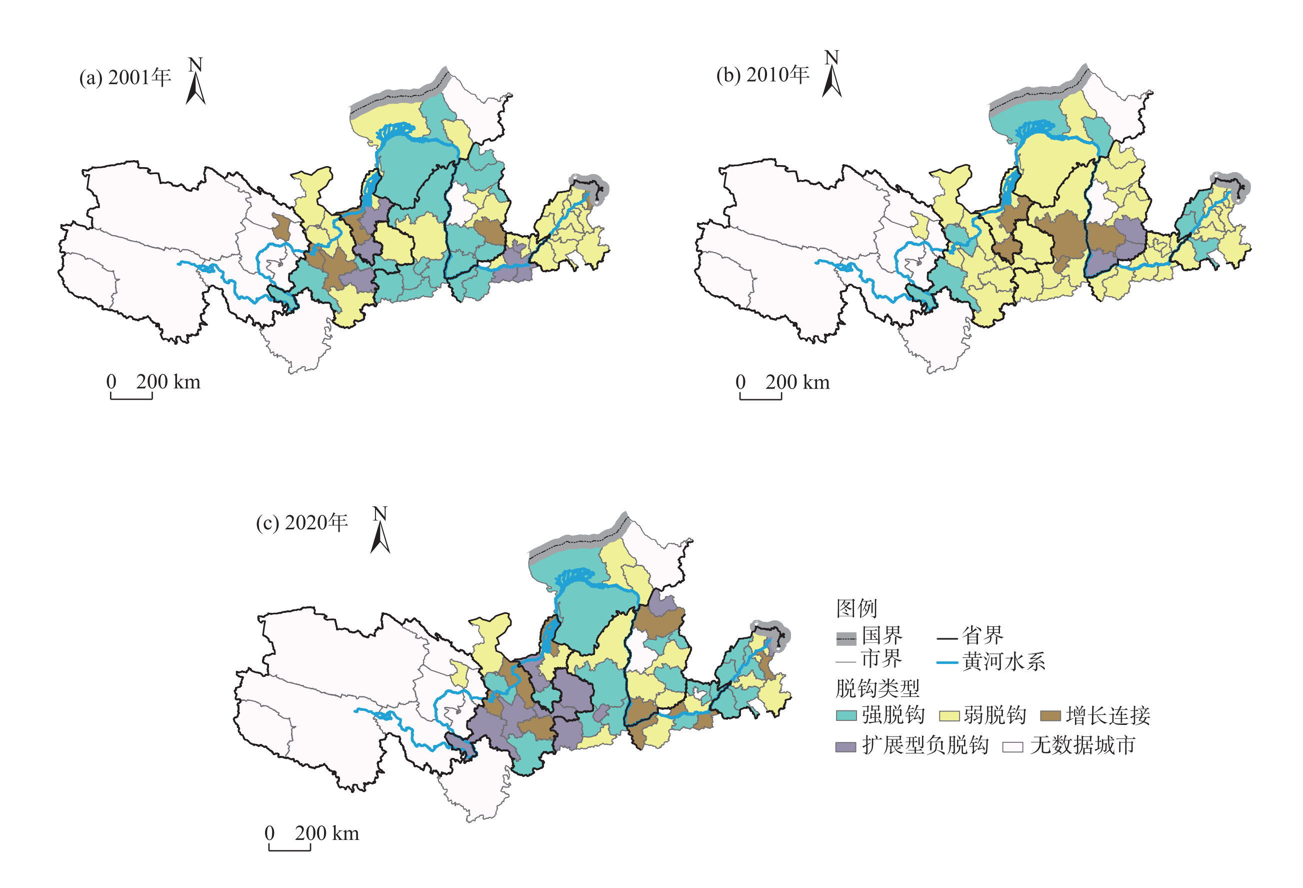


图4　2001、2010年和2020年黄河流域水资源利用脱钩空间分布

Fig. 4　Spatial distributions of water utilization decoupling in the Yellow River Basin in 2001, 2010 and 2020

流域处于强脱钩状态的城市增多,但也有较多城市水资源利用与经济发展脱钩状态不够理想,主要有朔州(2.569)、东营(2.322)等。从流域层面来看,黄河流域上、中、下游地区的水资源利用脱钩程度差异显著,2001—2020年呈现出下游最优、中游次之、上游较弱的空间分异格局,体现了黄河流域各地区发展不平衡、不充分的典型特征。

2.3.3　不同行业水资源利用脱钩的动态演变特征　"十五"至"十三五"时期黄河流域上游农业生产用水脱钩弹性指数呈下降态势,脱钩效果逐渐向好;工业生产用水脱钩状态变动较大;服务业用水脱钩弹性指数正负交替出现(表4)。与上游相比,中游地区工农业生产用水脱钩弹性指数相对较小,脱钩状态更好;而服务业用水脱钩弹性指数变动较大。黄河

表4 黄河流域各行业水资源利用脱钩态势

Tab. 4 Decoupling trends in water utilization by sector in the Yellow River Basin

行业	规划期	脱钩弹性指数			脱钩态势		
		上游	中游	下游	上游	中游	下游
农业	“十五”	1.801	1.237	0.854	扩展性负脱钩	扩展性负脱钩	增长连接
	“十一五”	0.527	0.966	0.141	弱脱钩	增长连接	弱脱钩
	“十二五”	0.477	0.541	−0.042	弱脱钩	弱脱钩	强脱钩
	“十三五”	0.526	−0.635	0.108	弱脱钩	强脱钩	弱脱钩
工业	“十五”	0.038	0.161	0.460	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
	“十一五”	−0.059	−0.054	0.192	强脱钩	强脱钩	弱脱钩
	“十二五”	−0.510	−0.126	0.203	强脱钩	强脱钩	弱脱钩
	“十三五”	0.747	−1.075	−0.236	弱脱钩	强脱钩	强脱钩
服务业	“十五”	−0.325	0.255	0.084	强脱钩	弱脱钩	弱脱钩
	“十一五”	0.134	0.339	0.107	弱脱钩	弱脱钩	弱脱钩
	“十二五”	−0.285	−0.092	0.257	强脱钩	强脱钩	弱脱钩
	“十三五”	1.893	0.9833	0.803	扩展性负脱钩	增长连接	弱脱钩

流域下游地区农业生产用水脱钩状态整体优于工业生产用水和服务业生产用水，且服务业用水脱钩弹性指数逐年增大，脱钩效果不够理想。总体来看，“十五”至“十三五”时期，黄河流域中上游地区的农业生产用水与中游地区的工业生用水脱钩状态逐步改善；中游地区服务业用水和下游地区农业生产用水脱钩状态变动较大；服务业用水脱钩状态整体优于农业生产用水。

2.4 黄河流域水资源利用脱钩努力研究

2.4.1 水资源利用脱钩努力区域异质性分析 为了考察区域异质性，分别对黄河流域上游、中游、下游以及流域整体进行水资源利用脱钩努力分析（表5）。黄河流域整体水资源利用脱钩努力指标值不断增加，脱钩效应持续向好。分上、中、下游来看，黄河流域上游水资源利用脱钩效应呈现波动上升趋势，但一直处于低效状态；中游水资源利用脱钩

表5 黄河流域水资源利用脱钩努力区域异质性分析

Tab. 5 Analysis of regional heterogeneity in water utilization decoupling efforts in the Yellow River Basin

地区	规划期	用水强度	产业结构	水资源利用率	水资源禀赋	人口规模	总效应
上游	“十五”	−0.306	1.305	−0.943	−0.715	−0.115	−0.774
	“十一五”	0.142	0.858	−1.521	0.967	−0.044	0.402
	“十二五”	0.407	0.593	−1.154	0.916	−0.032	0.730
	“十三五”	0.903	0.100	−0.948	1.342	0.505	1.901
中游	“十五”	−0.144	1.144	−0.540	−0.843	−0.177	−0.560
	“十一五”	−0.158	1.157	−2.765	1.435	−0.341	−0.672
	“十二五”	0.395	0.605	−1.983	1.427	0.047	0.491
	“十三五”	0.440	0.006	2.050	−0.937	1.082	0.641
下游	“十五”	0.047	0.953	−0.681	0.091	−0.088	0.323
	“十一五”	0.102	0.899	−0.687	0.385	−0.105	0.592
	“十二五”	0.376	0.624	−1.255	1.225	−0.094	0.875
	“十三五”	0.335	0.666	−3.144	3.306	1.908	−0.696
流域整体	“十五”	0.026	0.974	−0.471	−0.199	−0.088	0.241
	“十一五”	0.115	0.885	−1.135	0.689	−0.129	0.425
	“十二五”	0.404	0.596	−1.255	1.072	−0.046	0.771
	“十三五”	0.527	0.463	2.819	−2.839	−0.129	0.841

努力指标值呈现先下降后上升态势，脱钩效应表现为"无脱钩效应-弱脱钩效应-强脱钩效应"的动态演变特征；黄河流域下游地区无脱钩效应情形出现在"十三五"时期。总的来说，产业结构效应对水资源利用脱钩的贡献最大，水资源禀赋效应次之，用水强度效应对上游地区的拉动效应更为明显，水资源利用率效应仅在"十三五"时期开始显现，人口规模效应虽抑制水资源利用脱钩效应实现，但作用相对较小。因此，未来黄河流域应将优化调整产业结构、优化水资源配置、降低水资源利用强度作为节水措施的主要选择，积极培育发展节水型产业，推动节水型社会建设。

2.4.2 水资源利用脱钩努力行业异质性分析　考虑到不同行业用水脱钩状态不一，有必要对政府在各行业实施的"节水控水"政策效果进行分析，具体如表6所示。"十五"至"十三五"时期农业生产用水的水资源利用脱钩努力指标值逐渐增大，脱钩效应持续增强，且在"十二五"至"十三五"时期实现了强脱钩；"十五"至"十三五"时期工业生产用水脱钩效应整体较弱，说明政府在工业行业的"节水控水"努力不足以抵消经济发展带来的用水量增加；与工农业生产用水相比，服务业用水脱钩效应不佳，脱钩努力指标值呈现先上升后下降变动特征。整体来看，用水强度效应贡献最大，水资源禀赋效应正负驱动作用均有出现，产业结构效应仅对农业生产用水脱钩发挥作用，人口规模效应的脱钩贡献较小，水资源利用率效应仅在"十三五"时期开始显现。虽然政策因素对水资源利用脱钩效应有一定作用，但在"十五"至"十三五"时期仅有农业在"十二五"至"十三五"时期出现了强脱钩效应。

3 讨论

本文以水资源短缺形势严峻的黄河流域地级市为研究对象，分地区与行业详细考察了"十五"时期至"十三五"时期水资源利用与经济发展脱钩效应，与已有研究相比[23]，分析结果更加客观、全面和细致。研究结果显示，黄河流域水足迹呈现波动上升态势，农业生产用水是其主要组成部分，这与潘忠文等[14]对全国水资源实际利用情况的测算结果一致；与李宁等[17]研究长江中游城市群水足迹的最终结果也相同。黄河流域水资源利用与经济发展的弱脱钩状态与高明国等[22]研究结果一致。胡西武等[15]将青海省作为研究对象，分析了水资源利用与经济增长脱钩状况，作为本文的一部分研究区域，对结果识别具有重要参考价值。

当前研究中，水资源利用与经济发展脱钩影响因素对水资源利用率、水资源禀赋等自然因素关注较少[1,7]。而本文发现，水资源禀赋效应对水资源利用变化及脱钩效应都有一定影响，且不同研究区域影响程度不同，而水资源利用率效应在"十三五"时期开始显现。进一步研究发现，不同因素对黄河流域不同地区、不同行业的影响程度差异显著。但用水强度效应和产业结构效应能够明显抑制水资源

表6　黄河流域水资源利用脱钩努力行业异质性分析

Tab. 6　Analysis of sectoral heterogeneity in water utilization decoupling efforts in the Yellow River Basin

行业	规划期	用水强度	产业结构	水资源利用率	水资源禀赋	人口规模	总效应
农业	"十五"	−0.061	0.977	−0.105	−0.487	−0.086	0.238
	"十一五"	0.251	1.264	−0.765	0.417	−0.173	0.994
	"十二五"	0.502	0.903	−1.515	1.265	−0.058	1.098
	"十三五"	0.637	0.502	2.283	−2.112	−0.130	1.180
工业	"十五"	0.066	−0.012	−0.002	−0.022	−0.004	0.026
	"十一五"	0.076	−0.006	−0.033	0.019	−0.007	0.050
	"十二五"	0.067	−0.003	−0.052	0.043	−0.002	0.053
	"十三五"	0.053	0.002	0.069	−0.063	−0.004	0.057
服务业	"十五"	0.036	0.003	−0.004	−0.013	−0.003	0.020
	"十一五"	0.039	−0.001	−0.019	0.011	−0.004	0.027
	"十二五"	0.034	0.000	−0.036	0.029	−0.002	0.026
	"十三五"	0.008	−0.005	0.065	−0.060	−0.004	0.004

消耗,这与已有研究[1,15]相互印证。

4 结 论

（1）2000—2020年黄河流域总体水足迹呈现波动上升趋势,其中农业生产用水占比最大,历年均在90%以上;工业生产用水和服务业用水次之;生态环境用水和进出口虚拟水含量所占比重均不超过5%。

（2）“十五”至“十三五”时期水资源利用变化总效应表现为波动下降特征,主要是经济发展效应、人口规模效应起正向驱动作用,用水强度效应、产业结构效应等起负向驱动作用,其中经济发展效应是用水量增加的决定性因素。

（3）黄河流域水资源利用与经济发展脱钩效果整体较好,主要有弱脱钩和强脱钩状态。分区域来看,中游和下游地区的脱钩效果好于上游地区;分行业来看,工业生产用水和服务业用水的脱钩状态优于农业生产用水。

（4）政府“节水控水”努力对水资源利用脱钩效应作用明显。区域层面,产业结构效应和水资源禀赋效应对水资源利用与经济发展脱钩至关重要;行业层面,用水强度效应是各行业水资源利用与经济发展实现脱钩的关键要素。人口规模效应和水资源利用率效应对区域及行业的脱钩作用有待进一步加强。

参考文献（References）

[1] 刘慧, 孙思奥, 方创琳, 等. 1990—2020年新疆用水量时空演化格局及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2024, 47(9): 1451-1461. [Liu Hui, Sun Siao, Fang Chuanglin, et al. Spatiotemporal evolutionary patterns and influencing factors of water use in Xinjiang from 1990 to 2020[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(9): 1451-1461.]

[2] 秦昌波, 葛察忠, 贾仰文, 等. 陕西省生产用水变动的驱动机制分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5): 131-136. [Qin Changbo, Ge Chazhong, Jia Yangwen, et al. Driving mechanism analysis for productive water consumption changes in Shaanxi Province[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(5): 131-136.]

[3] 孙才志, 谢巍. 中国产业用水变化驱动效应测度及空间分异[J]. 经济地理, 2011, 31(4): 666-672. [Sun Caizhi, Xie Wei. Measurement of the driving effects on industrial water utilization change and its spatial difference analysis in China[J]. Economic Geography, 2011, 31(4): 666-672.]

[4] 张扬, 郭彤彤, 张子恺. 农业绿色水资源利用与农业经济增长脱钩关系研究[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(11): 103-113. [Zhang Yang, Guo Tongtong, Zhang Zikai. Research on the decoupling relationship between agricultural green water resources utilization and agricultural economic growth[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(11): 103-113.]

[5] 姜明栋, 刘熙宇, 许静茹, 等. 京津冀地区经济增长对工业用水的脱钩效应及其驱动因素研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(11): 70-76. [Jiang Mingdong, Liu Xiyu, Xu Jingru, et al. Decoupling effect between economic growth and industrial water use and its driving factors in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(11): 70-76.]

[6] 聂志萍, 吴梦芝, 马海良. 基于LMDI和脱钩理论的我国生活用水影响因素研究[J]. 水利经济, 2019, 37(5): 11-26. [Nie Zhiping, Wu Mengzhi, Ma Hailiang. Affecting factors for domestic water use in China based on LMDI and decoupling theory[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(5): 11-26.]

[7] Wang Q, Jiang R, Li R R. Decoupling analysis of economic growth from water use in city: A case study of Beijing, Shanghai, and Guangzhou of China[J]. Sustainable Cities & Society, 2018, 41: 86-94.

[8] 潘安娥, 陈丽. 湖北省水资源利用与经济协调发展脱钩分析——基于水足迹视角[J]. 资源科学, 2014, 36(2): 328-333. [Pan An'e, Chen Li. Decoupling and water footprint analysis of the coordinated development between water utilization and the economy in Hubei[J]. Resources Science, 2014, 36(2): 328-333.]

[9] Zhang Y, Liu W X, Cai Y, et al. Decoupling analysis of water use and economic development in arid region of China: Based on quantity and quality of water use[J]. Science of the Total Environment, 2020, 761(2): 143275, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143275.

[10] 钟太洋, 黄贤金, 韩立, 等. 资源环境领域脱钩分析研究进展[J]. 自然资源学报, 2010, 25(8): 1400-1412. [Zhong Taiyang, Huang Xianjin, Han Li, et al. Review on the research of decoupling analysis in the field of environments and resource[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(8): 1400-1412.]

[11] Gllmont M. Water resource decoupling in the MENA through food trade as a mechanism for circumventing national water scarcity[J]. Food Security, 2015, 7(6): 1-19.

[12] 吴丹, 李昂, 张陈俊. 双控行动下京津冀经济发展与水资源利用脱钩评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(3): 150-160. [Wu Dan, Li Ang, Zhang Chenjun. Evaluation on the decoupling between the economic development and water resources utilization in the Beijing-Tianjin-Hebei region under dual control action[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(3): 150-160.]

[13] Wang Q, Wang X W. Is economic growth decoupling from water use? Empirical analysis of 31 Chinese provinces[J]. Science of the Total Environment, 2020, 726: 138362, doi: 10.1016/j.scito-

tenv.2020.138362.

[14] 潘忠文, 徐承红. 我国水资源利用与经济增长脱钩分析[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2019, 18(2): 97-108. [Pan Zhongwen, Xu Chenghong. Decoupling analysis of water resources utilization and economic growth in China[J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition), 2019, 18(2): 97-108.]

[15] 胡西武, 郭玮. 青海省水资源利用与经济增长脱钩研究[J]. 人民黄河, 2023, 45(8): 90-95. [Hu Xiwu, Guo Wei. Research on the decoupling of water resources utilization and economic growth in Qinghai Province[J]. Yellow River, 2023, 45(8): 90-95.]

[16] 王刚毅, 刘杰. 基于改进水生态足迹的水资源环境与经济发展协调性评价——以中原城市群为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(1): 80-90. [Wang Gangyi, Liu Jie. Coordinating evaluation of water resources environment and economic development based on improved water ecological footprint: A case study of Central Plains urban agglomeration[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(1): 80-90.]

[17] 李宁, 张建清, 王磊. 基于水足迹法的长江中游城市群水资源利用与经济协调发展脱钩分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(11): 202-208. [Li Ning, Zhang Jianqing, Wang Lei. Decoupling and water footprint analysis of the coordinated development between water utilization and the economy in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(11): 202-208.]

[18] 邓祥征, 杨开忠, 单菁菁, 等. 黄河流域城市群与产业转型发展[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2): 273-289. [Deng Xiangzheng, Yang Kaizhong, Shan Jingjing, et al. Urban agglomeration and industrial transformation and development in the Yellow River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(2): 273-289.]

[19] 刘华军, 乔列成, 孙淑惠. 黄河流域用水效率的空间格局及动态演进[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 57-68. [Liu Huajun, Qiao Liecheng, Sun Shuhui. Spatial distribution and dynamic change of water use efficiency in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 57-68.]

[20] 贾绍凤, 梁媛. 新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 29-36. [Jia Shaofeng, Liang Yuan. Suggestions for strategic allocation of the Yellow River water resources under the new situation[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 29-36.]

[21] 侯晋星, 潘换换, 杜自强, 等. 山西黄河流域水生态系统服务时空分析[J]. 干旱区地理, 2024, 47(6): 1047-1060. [Hou Jinxing, Pan Huanhuan, Du Ziqiang, et al. Spatiotemporal analysis of water ecosystem services of the Yellow River Basin in Shanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(6): 1047-1060.]

[22] 高明国, 陆秋雨. 黄河流域水资源利用与经济发展脱钩关系研究[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(8): 198-206. [Gao Mingguo, Lu Qiuyu. Decoupling relationship between water resources utilization and economic development in Yellow River Basin[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(8): 198-206.]

[23] 孙建峰, 杨银科, 曹兴达, 等. 黄河流域九省(区)水资源利用与经济发展脱钩效应分析[J]. 人民黄河, 2024, 46(2): 80-86. [Sun Jianfeng, Yang Yinke, Cao Xingda, et al. Analysis of the decoupling effect of water resources utilization and economic development in nine provinces of the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2024, 46(2): 80-86.]

[24] 水利部黄河水利委员会. 黄河年鉴(2018)[M]. 郑州: 黄河年鉴社, 2018: 503-508. [Yellow River Water Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources. Yellow River yearbook (2018)[M]. Zhengzhou: Yellow River Yearbook Press, 2018: 503-508.]

[25] 郭晗. 黄河流域高质量发展中的可持续发展与生态环境保护[J]. 人文杂志, 2020(1): 17-21. [Guo Han. Sustainable development and ecological environment protection in the high-quality development of the Yellow River Basin[J]. The Journal of Humanities, 2020(1): 17-21.]

[26] Chapagian A, Hoekstra A A. The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands[J]. Ecological Economics, 2007, 64(1): 109-118.

[27] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Virtual water trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade[C]//Hoekstra A Y. Value of Water Research Report Series No 12. Netherlands: IHE Delft, 2003: 13-23.

[28] Ang B W. LMDI decomposition approach: A guide for implementation[J]. Energy Policy, 2015, 86: 233-238.

[29] Fang D B, Hao P, Hao J. Study of the influence mechanism of China's electricity consumption based on multi-period ST-LMDI model[J]. Energy, 2019, 170: 730-743.

[30] Sun S, Fu G T, Bao C, et al. Identifying hydro-climatic and socioeconomic forces of water scarcity through structural decomposition analysis: A case study of Beijing City[J]. Science of the Total Environment, 2019, 687: 590-600.

[31] 马晓君, 陈瑞敏, 苏衡. 中国工业行业能源消耗的驱动因素与脱钩分析[J]. 统计与信息论坛, 2021, 36(3): 70-81. [Ma Xiaojun, Chen Ruimin, Su Heng. Driving factors and decoupling analysis on industrial energy consumption in China[J]. Journal of Statistics and Infomation, 2021, 36(3): 70-81.]

[32] 李秀花, 吴纯渊. 中国西北五省区水资源利用的协调性分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 9-16. [Li Xiuhua, Wu Chunyuan. Coordination of water resources utilization in the five provinces of northwest China[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 9-16.]

[33] 金凤君. 黄河流域生态保护与高质量发展的协调推进策略[J]. 改革, 2019(11): 33-39. [Jin Fengjun. Coordinated promotion strategy of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Reform, 2019(11): 33-39.]

Driving factors and decoupling effect of water resources utilization in the Yellow River Basin

YANG Yanyan, WANG Yongyu, XU Qiyang
(The School of Statistics and Data Sciences, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730020, Gansu, China)

Abstract: Realizing the sustainable utilization of water resources is a critical aspect of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin, China. This study uses water footprint theory and methodology to measure the actual water consumption of 56 cities in the Yellow River Basin from 2000 to 2020. It identifies the primary factors influencing water use changes with the logarithmic mean Divisia index method and constructs a decoupling effort index model based on the driver-pressure-state-influence-response framework to evaluate the decoupling effect of water resource utilization. The findings reveal the following: (1) The utilization of water resources in the Yellow River Basin exhibits a fluctuating upward trend from 2000 to 2020, with agricultural production water accounting for over 90% of the total consumption. (2) The economic development effect and population scale effect are the primary positive driving factors, while the water use intensity effect and industrial structure effect serve as the main negative driving factors. (3) The decoupling effect between water resource utilization and economic development in the Yellow River Basin is generally favorable, primarily characterized by weak and strong decoupling. The decoupling performance is better in the midstream and downstream regions compared to the upstream region, and industrial production water and service trade water demonstrate superior decoupling compared to agricultural production water. (4) In the transition process of the decoupling effect of water resource utilization, the industrial structure effect and water resource endowment effect are decisive for achieving regional decoupling, while the water use intensity effect and water resource endowment effect are critical for achieving industrial decoupling. The results offer a theoretical basis for the coordinated development of water resources and the economy in the Yellow River Basin.

Key words: water footprint; the DPSIR framework; logarithmic mean Divisia index; decoupling model; Yellow River Basin